

Modélisation De La Production De Charbon Actif Et D'huile Pyrolytique A Partir D'un Réacteur Polyvalent Sur Les Précurseurs Tourbes Et Coques De Noix De Palmiste

[Modeling Activated Carbon And Pyrolytic Oil Production From A Multi-Purpose Reactor On Peat And Palm Kernel Shell Precursors]

RAZAKAMAMPIANINA Valisoa F.¹, RAJAONARIVELO Jeannot A.², ANDRIANOMENTSOA
Bezanahary H.³, RAVONINJATOVO Achille O.⁴, RASOANAIVO Jean Luc⁵, ANDRIANAIVO Lala⁵,
ANDRIAMANANTENA Ndriananja S.⁷

^{1,7} Chercheur, Université d'Antananarivo, Ecole Doctorale des Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de
l'Innovation

^{2,3} Chercheur Enseignant, Centre National de Recherches Industrielle et Technologique (CNRIT) Fiadanana
Tsimbazaza-Antananarivo

^{4,5,6} Chercheur Enseignant, Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo
Auteur correspondant : RAZAKAMAMPIANINA Valisoa F. E-mail : razakamampianinavalisoa@gmail.com



Résumé – Compte tenu des enjeux environnementaux mondiaux liés à la pollution et à la gestion des déchets, ce travail explore l'application de l'économie circulaire à la valorisation de la biomasse par pyrolyse à voie sèche avec un procédé continu de carbonisation-activation. L'étude a porté sur la transformation de deux précurseurs — la tourbe et les coques de noix de palmiste — en charbon actif et en huile pyrolytique à l'aide d'un réacteur polyvalent. La méthodologie a intégré la modélisation par régression linéaire multiple pour prédire les rendements, ainsi que l'Analyse de Variance (ANOVA), pour évaluer l'influence de la température, du temps de séjour et de l'apport énergétique externe sur les produits finaux : le charbon actif et l'huile pyrolytique. Pour la tourbe, l'apport énergétique domine les rendements (>85% de contribution). Pour les coques de noix de palmiste, la température est clé pour le charbon (>60% de contribution), tandis que le charbon de bois de chauffe est prépondérant pour l'huile (55% de contribution). L'analyse comparative a mis en évidence que l'impact des paramètres varie significativement selon le précurseur, soulignant la polyvalence de la technologie et la nécessité d'adapter les conditions opératoires et la gestion énergétique à la biomasse spécifique. L'intégration d'un condenseur a été jugée cruciale pour maximiser le rendement en huile. Ces résultats fournissent des outils prédictifs et des informations d'optimisation pour le développement de technologies efficaces de production de charbon actif et d'huile pyrolytique à partir de diverses biomasses.

Mots-clés : *modélisation, charbon actif, huile pyrolytique, ANOVA, rendement*

Abstract - Addressing global environmental challenges related to pollution and waste management, this work explores circular economy application to biomass valorization via dry pyrolysis with a continuous carbonization-activation process. The study transformed two precursors—peat and palm kernel shells—into activated carbon and pyrolytic oil using a versatile reactor. The

methodology integrated multiple linear regression for yield prediction and Analysis of Variance (ANOVA) to evaluate the influence of temperature, residence time, and external energy input on the final products: activated carbon and pyrolytic oil. For peat, energy input dominates yields (>85% contribution). For palm kernel shells, temperature is key for carbon (>60% contribution), while heating charcoal is predominant for oil (55% contribution). Comparative analysis highlighted that parameter impact varies significantly by precursor, emphasizing technology versatility and the need to adapt operating conditions and energy management to specific biomass. Condenser integration was crucial for maximizing oil yield. These results provide predictive tools and optimization information for developing efficient activated carbon and pyrolytic oil production technologies from diverse biomasses.

Keywords: *linear modeling, activated carbon, pyrolytic oil, ANOVA, yield.*

I. INTRODUCTION

La valorisation des résidus de biomasse par des technologies thermo-chimiques représente une voie prometteuse pour la production d'énergie et de produits chimiques à haute valeur ajoutée, en réponse aux défis mondiaux de l'épuisement des combustibles fossiles et de la gestion des déchets. En continuité avec les travaux de recherches que nous avons entamés dans le cadre de la transformation d'intrants diversifiés en charbon actif et en huile pyrolytique [1], l'article se focalise sur les essais de production menés à partir de deux précurseurs différents : la tourbe et les coques de noix de palmiste. Les coques de noix de palmiste, sous-produits de l'industrie l'huile de palme, sont souvent sous-exploitées ou brûlées de manière inefficace. La tourbe, quant à elle, bien que non renouvelable à l'échelle humaine, est une ressource carbonée qui peut être transformée pour des applications industrielles spécifiques. Leur conversion en charbon actif, connu pour ses propriétés adsorbantes exceptionnelles, et en huile pyrolytique, un bio-carburant potentiel et source de produits chimiques, offre une solution doublement bénéfique : valorisation des déchets et production de matériaux utiles. L'intérêt du charbon actif et de l'huile pyrolytique est ainsi indubitable au vu du contexte actuel et de l'omniprésence du besoin exprimé envers ces derniers dans une multitude de secteurs vitaux, à l'instar de l'agriculture, l'énergie, l'eau, la dépollution et la manufacture et la pharmaceutique[2], [3], [4], [5], [6], [7].

L'unité de distillation sèche proprement dite et la méthodologie suivie pour l'activation du précurseur sont les mêmes pour les deux cas, exception faite du raccordement de ce dernier à un condensateur pour le cas des essais avec les déchets de biomasse dans le but de maximiser le rendement en termes d'huile pyrolytique. Hormis notre but de prouver la polyvalence de la technologie pour ainsi étendre son application au service de l'économie circulaire, l'article explore les essais de production par une analyse statistique des données recueillies au cours des expérimentations menées au Centre National de Recherches Industrielle et Technologique (CNRIT) pour ainsi être en mesure de prédire les rendements en charbon et en huile pyrolytique mais également d'évaluer l'influence relative des paramètres opératoires sur les rendements finaux des produits. Les résultats contribueront ainsi à une meilleure compréhension des mécanismes de pyrolyse sèche pour des biomasses complexes et fourniront des outils prédictifs et des informations d'optimisation pour le développement de technologies plus efficaces de production de charbon actif et d'huile pyrolytique.

II. METHODOLOGIE

Les matières premières, la tourbe et les coques de noix de palmiste, sont des composés lignocellulosiques dont les propriétés ont été caractérisées au préalable pour vérifier leur potentiel à titre de précurseur [1]. L'analyse et la manipulation des données pour la modélisation linéaire de la production et le rapprochement comparatif entre les deux précurseurs ont été réalisés en exploitant les méthodes statistiques par l'outil de programmation R et le langage y afférent.

A. Modélisation linéaire

La méthode de régression linéaire multiple a été choisie pour représenter la modélisation de la prédictibilité de la production des extraits à partir des données relatives aux conditions opératoires. En accord avec les données recueillies au cours des essais, les équations de régression linéaire issues des deux séries d'essais prendront la forme générale de l'équation (1).

Rappelons que chaque coefficient indique le degré de variabilité de la variable expliquée pour chaque unité de changement de la variable explicative.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \beta_2 \cdot X_2 + \beta_3 \cdot X_3 + \epsilon \quad (1)$$

Y est ici la masse de charbon actif obtenue, autrement dit la variable dépendante

X_1 , X_2 et X_3 les variables indépendantes avec :

X_1 la température maximale atteinte

X_2 la masse de combustible mobilisée pour entretenir la réaction

X_3 le temps de séjour

En termes de coefficients, nous avons :

β_0 , l'ordonnée à l'origine.

β_1 , le coefficient de régression X_1 β_2 , est le coefficient de régression pour X_2

β_3 est le coefficient de régression pour X_3

ϵ est le terme d'erreur résiduelle

Le test de normalité des résidus s'impose, l'hypothèse de la distribution normale des résidus étant supposée. Il implique aussi la vérification de la fiabilité du p-value et celle des intervalles de confiance, outre la validité des tests statistiques. Nous avons ainsi fait appel à la représentation des résidus par le diagramme quantile-quantile ou QQ-plot pour évaluer à première vue la distribution de la série par rapport à la distribution Normale.

Le coefficient R^2 ou coefficient de détermination, une mesure clé en régression qui évalue la qualité d'ajustement d'un modèle qui illustre proportion de la variation de la variable dépendante (Y) expliquée par le modèle de régression.

Le test F désigne une famille de tests statistiques où la statistique calculée suit une loi de Fisher sous l'hypothèse nulle (H_0). Quant à son interprétation, il s'agit de s'appuyer sur la probabilité critique ou p-value, qui représente la probabilité, sous H_0 , d'obtenir une valeur au moins aussi extrême que celle observée dans les données. Si la p-value est inférieure au seuil choisi (généralement 0,05), on rejette H_0 .

B. Analyse de sensibilité

Dans le but d'évaluer l'impact significatif des variables expérimentales sur les paramètres de réponse mesurés, l'Analyse de Variance (ANOVA) a été employée comme méthode statistique principale. L'ANOVA permet de déterminer si les moyennes de deux groupes ou plus sont significativement différentes les unes des autres, en décomposant la variabilité totale des données en composantes attribuables à des facteurs spécifiques et une composante résiduelle, autrement dit l'erreur. Cette approche est particulièrement pertinente pour les études expérimentales où plusieurs niveaux de facteurs sont testés simultanément, comme c'est le cas lors de l'exploration de l'influence de la température, de la masse de combustible et de la durée sur les rendements de charbon actif et d'huile pyrolytique. L'ANOVA permet de confirmer la pertinence des facteurs étudiés et d'identifier les interactions éventuelles entre ces facteurs, fournissant ainsi une base robuste pour l'interprétation des résultats expérimentaux et la validation du modèle.

C. Analyse comparative

Les analyses comparatives explorent les différences observées en deux temps en se référant aux points conditions opératoires adoptées, plus particulièrement à l'utilisation d'un condenseur raccordé directement au réacteur de distillation : le rendement en charbon actif par rapport à la température et le rendement en huile pyrolytique par rapport à la température. Les

rapprochements des rendements sont illustrés par des graphes, avec la température en abscisse et le rendement exprimé, que ce soit en termes de charbon actif ou d'huile pyrolytique en ordonnée.

III. RÉSULTATS

A. Cas du précurseur « tourbe »

L'équation de régression linéaire prends la forme de l'équation (2) :

$$Y = 1452,36 - 0,981X_1 - 0,056X_2 - 0,2804X_3 \quad (2)$$

La médiane des résidus est proche de zéro (0.6454), ce qui est souhaitable car cela indique que les erreurs ne sont pas systématiquement positives ou négatives, et que le modèle ne sous-estime ni ne surestime généralement la variable dépendante. Le diagramme quantile-quantile généré pour le test de normalité des résidus est représenté ci-dessous par la Fig. 1. La majorité des points suivent l'axe de normalité, exception faite des trois points extrêmes retrouvés aux valeurs faibles et aux valeurs élevées.

Les p-value des coefficients estimés sont respectivement : 0,00149 ; 0,00902 ; 0,03969 ; 0,04574 ; toutes les variables explicatives sont statistiquement significatives à un seuil acceptable, voire hautement significatives pour les deux premières. Les coefficients étant négatifs, l'augmentation de ces facteurs est associée à une diminution de la variable dépendante.

La distribution des résidus semble légèrement asymétrique car la valeur maximale (26,1087) est plus éloignée de la médiane que la valeur minimale (-17,2952), suggérant une queue plus longue vers les résidus positifs. Le 3ème quartile (5,0518) est également plus éloigné de la médiane (0,6454) que le 1er quartile (-12,4455), ce qui confirme une certaine asymétrie vers les valeurs positives (peut-être une légère sous-estimation pour certaines observations élevées).

Le coefficient R^2 multiple indique que 87,97% de la variance de la variable dépendante est expliquée par votre modèle, confirmant que le modèle a une excellente capacité prédictive et que l'ajout des trois prédicteurs est justifié.

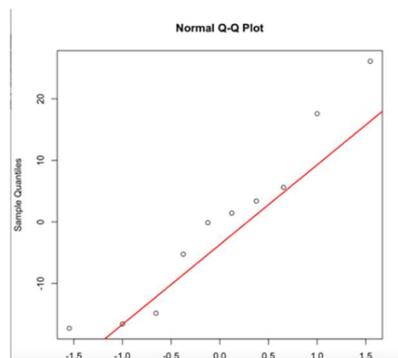


Fig. 1 QQ-plot – Séries d'essai de production à partir de la tourbe

B. Cas du précurseur « coques de noix de palmiste »

L'équation de régression linéaire prends la forme de l'équation (3) :

$$Y = 260,245 - 0,018X_1 + 0,0029X_2 - 0,3141X_3 \quad (3)$$

L'estimation des coefficients nous renvoie aux hypothèses suivantes : pour chaque augmentation d'une unité de X_1 , la température maximale atteinte, la variable dépendante diminue en moyenne de 0,018073, en maintenant les autres variables constantes. De même, Pour chaque augmentation d'une unité de X_2 , la variable dépendante diminue en moyenne de 0,002972 et pour chaque augmentation d'une minute de X_3 , la variable dépendante diminue en moyenne de 0,314129.

Les résidus sont relativement petits, variant de -0.75657 à 0.65142 pour la totalité des ajustements. Des p-values relativement élevées sont identifiées (0,466 ; 0.771 ; 0,400).

Le coefficient de détermination indique une valeur de 0,7051, signifiant que le modèle explique environ 70.51% de la variabilité de la variable dépendante, la masse de charbon actif produite. La valeur de la probabilité critique atteint les 0,65.

C. Analyse de sensibilité

Les graphiques ANOVA analysent la contribution de chaque paramètre expérimental à la variance observée dans les rendements de production de charbon actif issu de la biomasse et d'huile pyrolytique pour deux précurseurs distincts : la tourbe et les coques de noix de palmiste.

La Fig. 2 illustre l'analyse de sensibilité ANOVA menée pour les séries d'essai à partir de la tourbe à titre de précurseur :

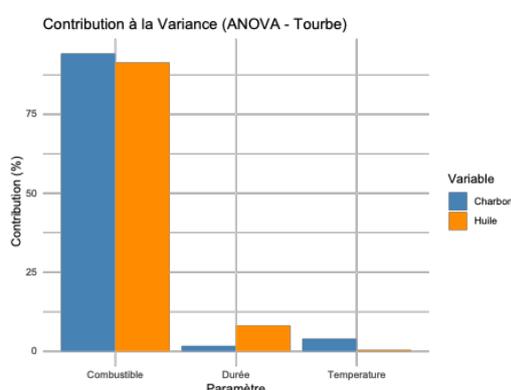


Fig. 2 ANOVA / Série d'essais sur la tourbe

La Fig. 3, quant à elle, expose l'analyse de sensibilité ANOVA menée pour les séries d'essai à partir des coques de noix de palmiste :

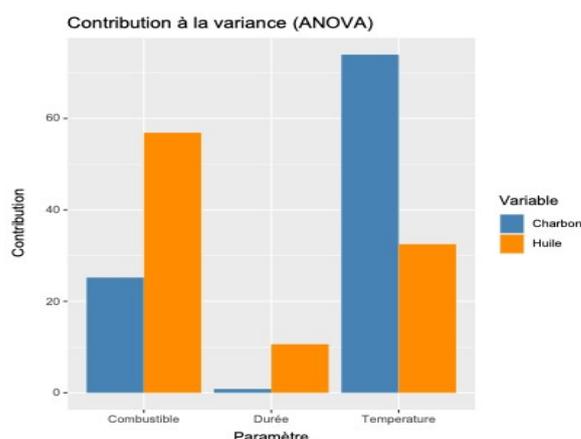


Fig. 3 ANOVA / Série d'essais sur les coques de noix de palmiste

D. Analyse comparative

Cette partie se focalise principalement sur la confrontation des deux points suivants :

- Le rendement en charbon actif par rapport à la température et à la présence ou non de condenseur, est illustré par la Fig. 4 :

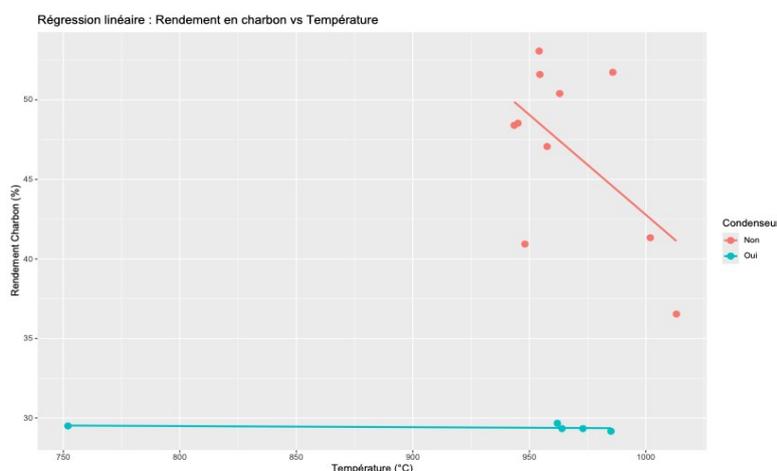


Fig. 4 Rendement en charbon en fonction de la température

- Le rendement en huile pyrolytique par rapport à la température et à la présence ou non de condenseur, est représenté par la Fig. 5 :

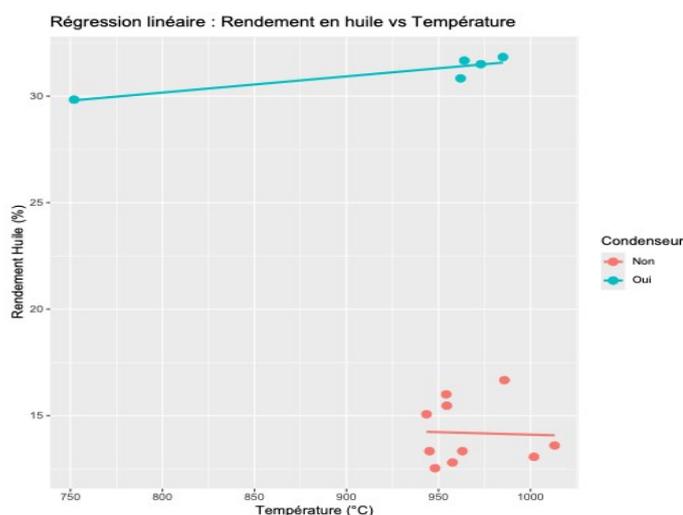


Fig. 5 Rendement en huile pyrolytique en fonction de la température

III. DISCUSSION

La masse initiale de précurseur n'a pas été intégrée parmi les variables explicatives étant donné qu'il lui a été attribué une valeur constante pour chaque jeu de données afférentes aux deux catégories d'essais de production : 750 g pour la tourbe et 600 g pour les coques de noix de palmiste.

Les points divergents aux extrémités du diagramme QQ représentent des valeurs aberrantes rencontrées lors des premières séries de production pour le jeu de données afférent au précurseur tourbe, illustrant des queues lourdes. Ceci est expliqué par les temps de séjours qui diffèrent largement du lot, en raison de l'utilisation d'un souffleur pour accélérer le procédé pour quelques séries d'essai. Il faut remarquer que plus le temps de séjour est étendu, plus la perte de masse est significative dans

notre cas au vu des conditions opératoires adoptées. Toutefois, une partie significative des points se positionnent dans la zone privilégiée par le tracé de la ligne de normalité, ainsi, nous sommes en mesure de retenir l'hypothèse de normalité pour le reste des essais réalisés.

Bien que les tests statistiques ne présentent pas assez de preuves pour conclure l'impact linéaire significatif des variables explicatives sur la variable dépendante, la difficulté majeure réside dans le nombre d'essai réalisé relativement limité pour le cas des coques de noix de palmiste. En effet huit essais ont été réalisés en total, mais les trois premiers ont été infructueux en raison de problèmes techniques liés au combustible et au capteur thermocouple. Les données issues de ces derniers ont alors été écartées à titre de valeurs aberrantes pour éviter de fausser la prédiction formulée. Une fois les problèmes techniques écartées et les conditions opératoires maîtrisées, les données retenues sont relativement similaires. La limitation des séries d'essais est une résultante de ce fait, outre les contraintes organisationnelles. Toutefois, force est d'admettre que le modèle généré pour la prévision de production à partir des coques de noix de palmiste capture davantage le bruit des données, étant relativement sensible aux valeurs individuelles des points. Ainsi, le degré de liberté réduit à l'unité remet en question la fiabilité du modèle bien que les données dégagées au cours des essais soient techniquement représentatives.

Au sujet de l'analyse de sensibilité, pour les essais de production à partir de la tourbe, l'apport énergétique externe pour maîtriser l'évolution thermique au sein du creuset est un facteur largement dominant en termes de rendement en charbon actif, ce dernier étant garant de l'efficacité du transfert de chaleur. Le temps de séjour et la température présentent des contributions relativement faibles, suggérant que si l'apport énergétique est suffisant, les variations fines de température ou de durée n'ont plus d'impact majeur sur le rendement en charbon. Pareillement pour le rendement en huile, hormis le fait que la durée a une contribution légèrement plus perceptible par rapport à la température maximale.

Pour les essais avec les coques de noix de palmiste, la température est le facteur le plus dominant, expliquant bien plus de 60% de la variance du rendement en charbon. L'apport énergétique via le chauffage externe vient en second lieu, avec une contribution notable, en affectant la cinétique de pyrolyse et la capacité à atteindre et maintenir la température optimale. La durée se positionne en dernier lieu, ce paramètre étant relativement similaire pour l'ensemble des essais réalisés. Cette série ayant été réalisée ultérieurement à celle avec la tourbe, nos investigations nous ont déjà permis d'ajuster ce paramètre. Concernant le rendement en huile, l'apport énergétique externe est le déterminant principal en accaparant 55% de la contribution à la variance, suivi par la température maximale atteinte puis par le temps de séjour.

L'analyse comparative démontre clairement l'importance significative du condenseur en termes de maximisation de la quantité d'huile pyrolytique recueillie bien que d'autres paramètres soient en mesure de venir appuyer ce phénomène selon la littérature. Par réciproque, l'absence de condenseur au cours des essais de production à partir de la tourbe renvoie à un rendement largement plus élevé en charbon actif en termes de pourcentage. Les recherches antérieures suggèrent quant à eux que le choix de la vitesse de pyrolyse influence significativement la composition des produits obtenus, autrement dit la répartition des rendements en biochar et en huile pyrolytique. Ainsi, d'une part une pyrolyse lente avec des températures plus basses favoriserait la production de biochar. De l'autre, une pyrolyse rapide dont le temps de séjour peut se limiter en secondes dans certains cas, aussi appelé pyrolyse flash, est une alternative pour la production de biocarburants [8], [9].

Que ce soit en termes de modélisation mathématiques ou d'analyse comparative, la littérature existante se focalise surtout sur la modélisation de la cinétique de la réaction chimique de transformation et des phénomènes d'adsorption associés directement à la caractérisation de la performance des charbons actifs issus des essais de production à partir de matériaux lignocellulosiques dont la production diffère en termes de précurseurs ou de méthode d'activation. La modélisation des équations liées à la cinétique d'adsorption sur des éléments chimiques ciblés est également privilégiée dans cette optique, à l'instar du fer[10], des métaux lourds (Pb, Ni, Cr, Cu) [11], ou des composés organiques[12][13]. Les isothermes d'adsorption pris en compte sont en général le modèle de Freundlich et celui de Langmuir, la théorie de Langmuir étant le point de départ de [14].

En perspective, l'ajout de plusieurs séries d'essais serait judicieux pour le cas des coques de noix de palmiste, pour ainsi augmenter la fiabilité du modèle et élargir le degré de liberté. Pour le précurseur tourbe, les essais de production ayant eu recours

au souffleur devraient être isolés pour homogénéiser davantage les données dans l'optique d'atteindre une normalité parfaite des résidus.

RÉFÉRENCES

- [1] V. Razakamampianina, « Activation physique d'une roche carbonnée : Essais de production à partir de la tourbe », *Int. J. Progress. Sci. Technol.*, vol. 35, n° 1, p. 232-241, 2022.
- [2] S. Ravulapalli et R. Kunta, « Removal of lead (II) from wastewater using active carbon of *Caryota urens* seeds and its embedded calcium alginate beads as adsorbents », *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 6, n° 4, p. 4298-4309, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.06.033>.
- [3] L. Ye *et al.*, « A comprehensive review on biochar-based materials for the safe utilization and remediation of heavy metal-contaminated agricultural soil and associated mechanisms », *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 13, n° 3, p. 116179, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.116179>.
- [4] E. Astuti, Z. Mufrodi, G. Budiarti, M. Husna, et A. Dewi, « Active Charcoal from Palm Kernel Shells as a Catalyst in The Production of Biodiesel », *J. Bahan Alam Terbarukan*, vol. 9, p. 120-125, janv. 2021, doi: [10.15294/jbat.v9i2.21991](https://doi.org/10.15294/jbat.v9i2.21991).
- [5] I. Alouiz, M. Aqil, M. Dahbi, M. Y. Amarouch, et D. Mazouzi, « Performance of high-energy storage activated carbon derived from olive pomace biomass as an anode material for sustainable lithium-ion batteries », *Resour. Chem. Mater.*, p. 100086, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.recem.2024.11.001>.
- [6] S. R. Mishra *et al.*, « Microporous activated carbon from *Madhuca Longifolia* flower for efficient methylene blue dye removal in wastewater treatment », *Surf. Interfaces*, vol. 69, p. 106770, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surf.2025.106770>.
- [7] Y. Lei *et al.*, « Activated carbon as a deodorisation agent for *Gracilaria changii*: Impact on volatile profile, physicochemical properties, and antioxidant activity », *Food Biosci.*, vol. 69, p. 106895, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.106895>.
- [8] Q. Yan, H. Toghiani, F. Yu, Z. Cai, et J. Zhang, « Effects of Pyrolysis Conditions on Yield of Bio-Chars from Pine Chips », *For. Prod. J.*, vol. 61, p. 367-371, sept. 2011, doi: [10.13073/0015-7473-61.5.367](https://doi.org/10.13073/0015-7473-61.5.367).
- [9] D. Bergna, T. Varila, H. Romar, et U. Lassi, « Comparison of the properties of activated carbons produced in one-stage and two-stage processes », vol. 4, n° 3, p. 41, 2018.
- [10] A. Diop, M. Faye, D. Diedhiou, et P. Diop, « Étude comparative des performances d'un charbon actif commercial et de charbons actifs élaborés à base de coques et de tourteaux de graines de neem (*Azadirachta indica* A. Juss): application à l'élimination du fer en solution aqueuse », *Afr. Sci.*, vol. 21, n° 4, p. 194-211, 2022.
- [11] D. Bindhu, C. O. Sreekala, et R. Jose, « Honeycomb-shaped biomass-derived porous carbon for removal of the heavy metal ions from domestic and industrial wastewaters », *Diam. Relat. Mater.*, vol. 157, p. 112528, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2025.112528>.
- [12] P. Atheba, N. B. Allou, P. Drogui, et A. Trokourey, « Adsorption Kinetics and Thermodynamics Study of Butylparaben on Activated Carbon Coconut Based », *J. Encapsulation Adsorpt. Sci.*, vol. 08, p. 39-57, janv. 2018, doi: [10.4236/jeas.2016.82003](https://doi.org/10.4236/jeas.2016.82003).
- [13] R. Nedjai, N. Kabbashi, M. Alam, et M. Al-Khatib, « Production and Characterization of Activated Carbon from Baobab Fruit Shells by Chemical Activation Using $ZnCl_2$, H_3PO_4 and KOH », *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2129, p. 012009, déc. 2021, doi: [10.1088/1742-6596/2129/1/012009](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2129/1/012009).

- [14] N. Bezzi et F. Barka Bouaifel, « Chapitre 5. Modèles d'isothermes d'adsorption et leurs applications », in *Chimie des surfaces et catalyse*, in *Références sciences.* , Paris: Ellipses, 2022, p. 113-136. [En ligne]. Disponible sur: <https://stm.cairn.info/chimie-des-surfaces-et-catalyse--9782340069725-page-113?lang=fr>